

プラズマ・複相間輸送ユニット成果報告

ユニット長 増崎 貴

プログラム

1. 全体概要 増崎
2. 核融合炉ダイバータ研究の学際的展開 小林政弘
3. 直線型プラズマ装置（HYPER-I, TPD-II）における研究の展開 吉村信次
4. 質疑応答

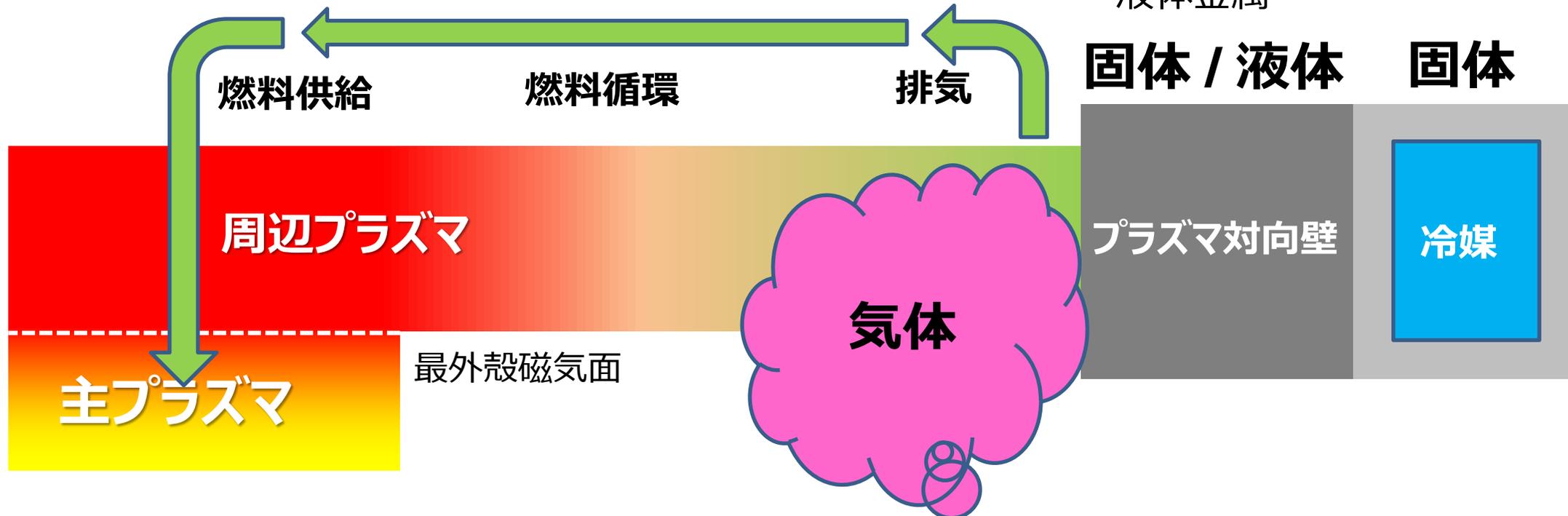
プラズマ複相間輸送ユニットの研究目的・目標

- **磁場閉じ込め核融合炉**の開いた磁力線領域から壁へ、そして壁を冷却する冷媒、あるいは排気装置を経て燃料循環系に至る、プラズマと固体、液体、気体が接する系における熱・粒子・運動量の輸送現象を理解し、予測し、制御する
- **他の様々な分野**に、核融合に関する研究から得られる知見や技術を展開し、その進展に寄与する

核融合システムにおける研究対象

磁化プラズマと固体・液体・気体が結合した非平衡・非線形系の物理や、輸送現象の物理に関する研究を行う

- 高融点金属
- 溶融層
- 液体金属



- プラズマ温度低減のための不純物ガス導入
- 壁からのリサイクリング粒子

プラズマ複相ユニットにおける研究の三本柱

周辺プラズマ輸送・粒子制御

周辺プラズマ輸送 周辺不純物輸送
粒子供給・排気

プラズマ・壁相互作用、炉工学

異材接合 中性子照射影響 液体金属
水素同位体蓄積・輸送



弱電離プラズマ・光・物質相互作用

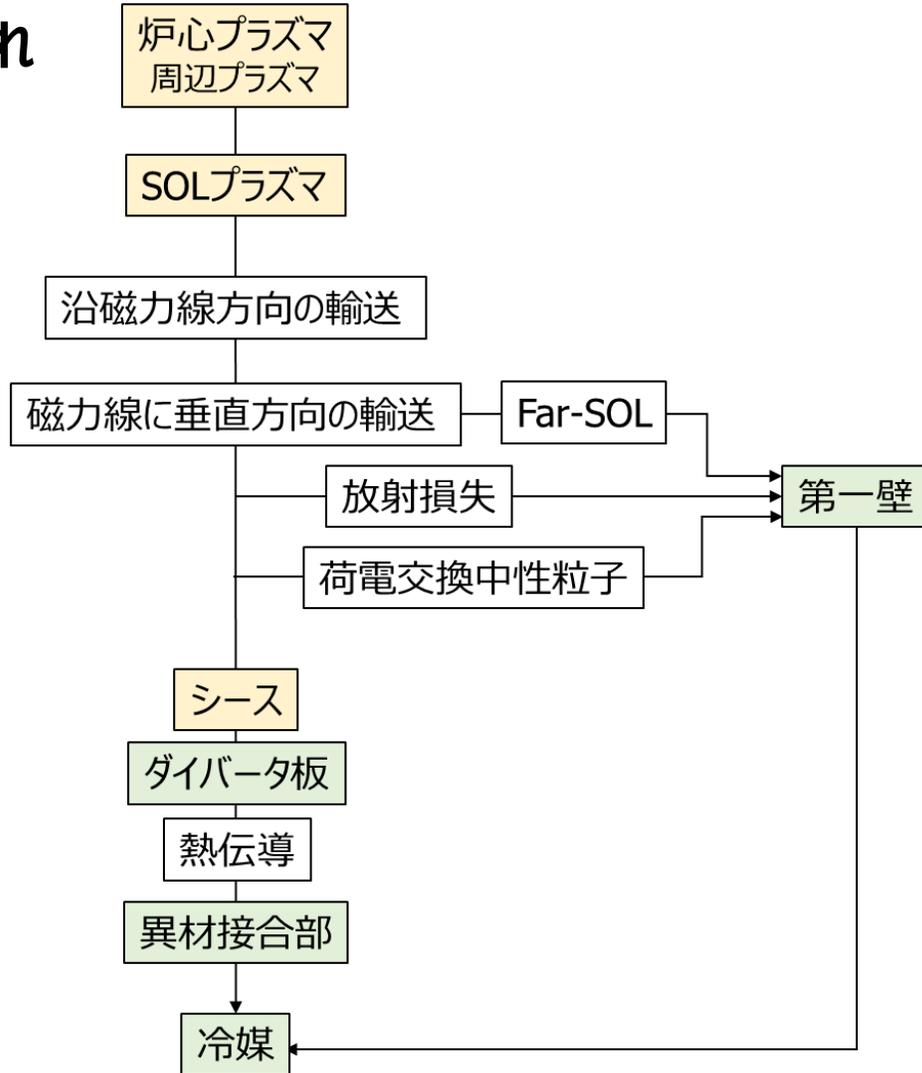
非接触プラズマの形成・安定性
原子・分子過程

アカデミックプラン：戦略（具体的な取り組み）

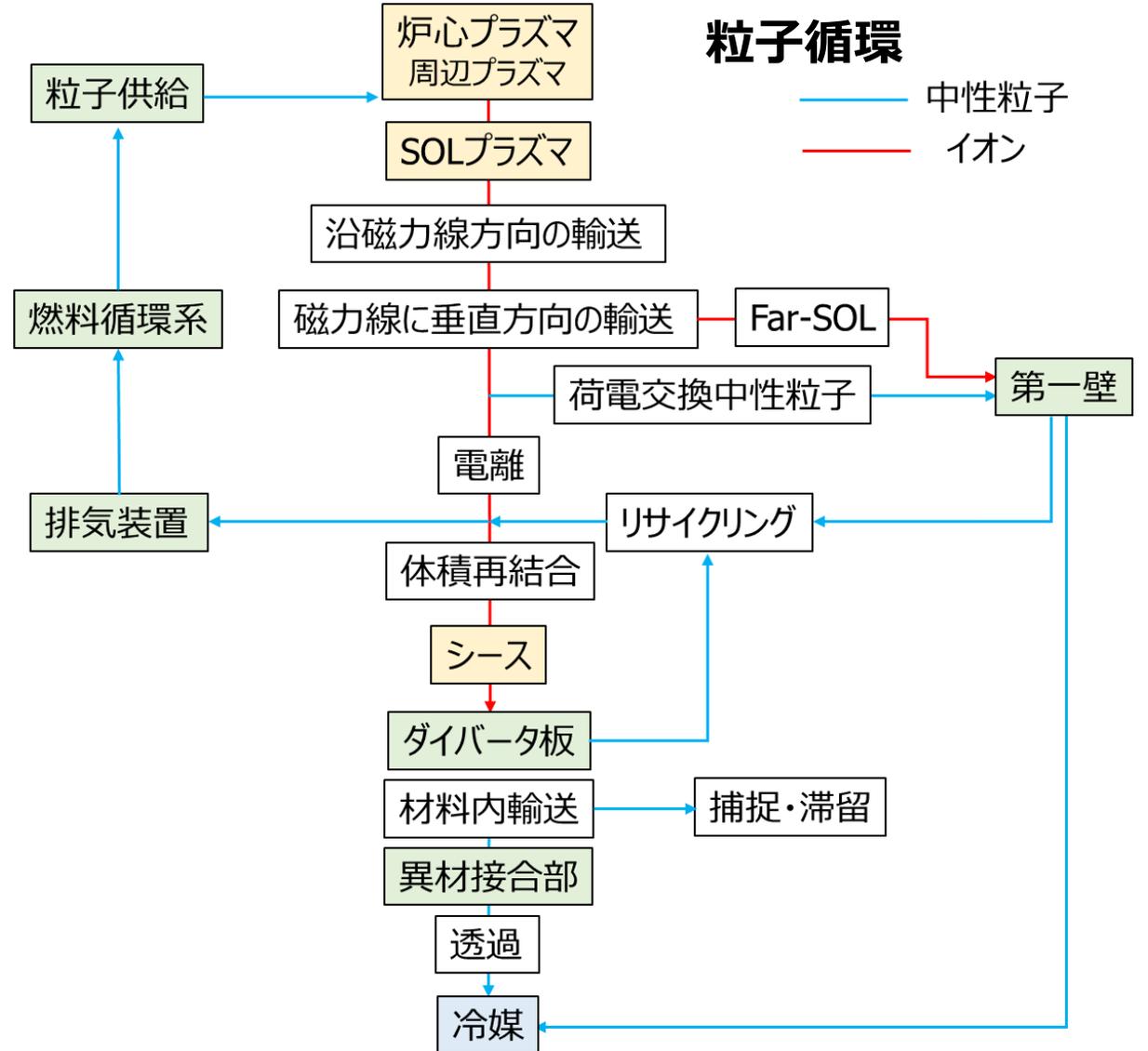
- 非接触プラズマ生成・維持のためのプラズマと気体との相互作用、プラズマと固体・液体対向壁との相互作用、対向壁中の粒子・エネルギー輸送と粒子蓄積、およびこれらの、動的現象への応答など、素過程の研究を進める。
- 開いた磁力線領域から壁・冷媒・排気装置に至る系の、時間・空間スケールが異なる素過程のつながりに焦点を当て、この系における輸送に対するモデリング、および制御方法を得る。
- プラズマと、固体、液体、気体という複数の相間にまたがる研究を一つのユニットで協同して行うことにより、それぞれの研究分野間のsynergy効果を促進する。

素過程の研究を進めるとともに俯瞰的視点からの研究も展開 定常プラズマ実験、要素モデルの改良とシミュレーションコードの連結

熱の流れ



粒子循環



実験での観測、シミュレーションによる再現

アカデミックプラン：戦術（どのように取り組んでいるか、計画と準備）



アカデミックプラン：戦術（どのように取り組んでいるか、計画と準備）

「周辺プラズマ、粒子制御」

特に不純物輸送（人為的に透過する不純物粉末を含む）について、実験および理論・シミュレーション研究を行っている。

中性粒子制御と高性能プラズマの関係に注目した実験研究を実施している。

「プラズマ・壁相互作用、炉工学」

LHDや他の実験装置のプラズマ対向壁の表面変化・水素同位体蓄積分析データとの比較からシミュレーションの妥当性検証や精度の高度化を行っている。

液体金属を用いたプラズマ対向壁研究では直線型プラズマ装置を用いたプラズマ照射実験を進めている。高熱負荷プラズマ対向壁のための異材接合について、ろう付けとスパークプラズマシンタリングでの接合の研究を進めている。

プラズマと固体の相互作用研究やプラズマ対向壁の開発に不可欠な微細構造分析装置群と表面分析装置群を運用し、共同研究、産学連携を進めている。（フュージョン・ナノプラットフォーム）

中性粒子制御を基軸とした国際研究ネットワーク

核融合科学研究所・
周辺プラズマ・粒子循環サブユニット

ダイバータ排気
堆積層による共堆積
中性粒子計測
モデリング

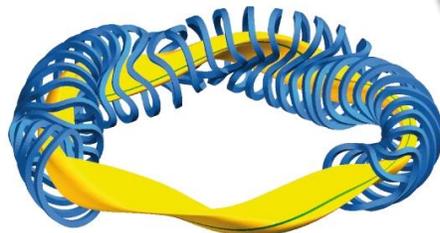


Dr. G. Motojima
Dr. T. Morisaki
Dr. S. Masuzaki
Dr. R. Kanno

国際ワーキンググループ
CWGM Organizing Committee

ドイツ

マックスプランク・
プラズマ物理研究所
W7-X装置



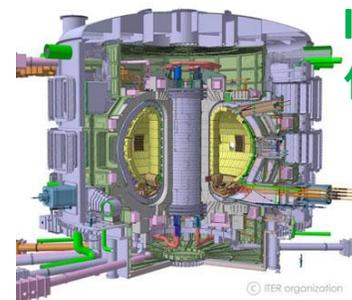
ダイバータ排気
堆積層による共堆積
中性粒子計測

Dr. N. Dirk
Dr. C.P Dhard
Dr. U. Wenzel

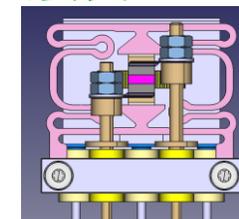
粒子循環の確立

プラズマ・複相間輸送に関連

フランス・ITER,
量子科学技術研究開発機構・
JT-60SA



国際プロジェクト
ITERリサーチプラン日本
代表委員



ITERタイプの中性粒子圧力計測

U. Wenzel, G. Motojima+, to be submitted to Rev. Sci. Instrum.

国際ITPA SOL/Div TG
メンバー

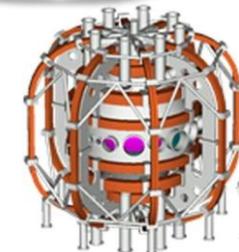
Dr. U. Wenzel
Dr. V. Haak



京都大学・
ヘリオトロンJ装置

中性粒子計測

Dr. K. Nagasaki
Dr. S. Kado



ダイバータ排気

九州大学・
QUEST装置

Dr. K. Hanada

アカデミックプラン：戦術（どのように取り組んでいるか、計画と準備）

「周辺プラズマ、粒子制御」

特に不純物輸送（人為的に透過する不純物粉末を含む）について、実験および理論・シミュレーション研究を行っている。

中性粒子制御と高性能プラズマの関係に注目した実験研究を実施している。

「プラズマ・壁相互作用、炉工学」

LHDや他の実験装置のプラズマ対向壁の表面変化・水素同位体蓄積分析データとの比較からシミュレーションの妥当性検証や精度の高度化を行っている。

液体金属を用いたプラズマ対向壁研究では直線型プラズマ装置を用いたプラズマ照射実験を進めている。高熱負荷プラズマ対向壁のための異材接合について、ろう付けとスパークプラズマシンタリングでの接合の研究を進めている。

プラズマと固体の相互作用研究やプラズマ対向壁の開発に不可欠な微細構造分析装置群と表面分析装置群を運用し、共同研究、産学連携を進めている。（フュージョンエネルギー・ナノプラットフォーム）

フュージョンエネルギー・ナノプラットフォーム

核融合科学の推進

フュージョンエネルギー・ナノプラットフォーム

想定される異分野共同研究



アカデミックプラン：戦術（どのように取り組んでいるか、計画と準備）

「弱電離プラズマ・光・物質相互作用」

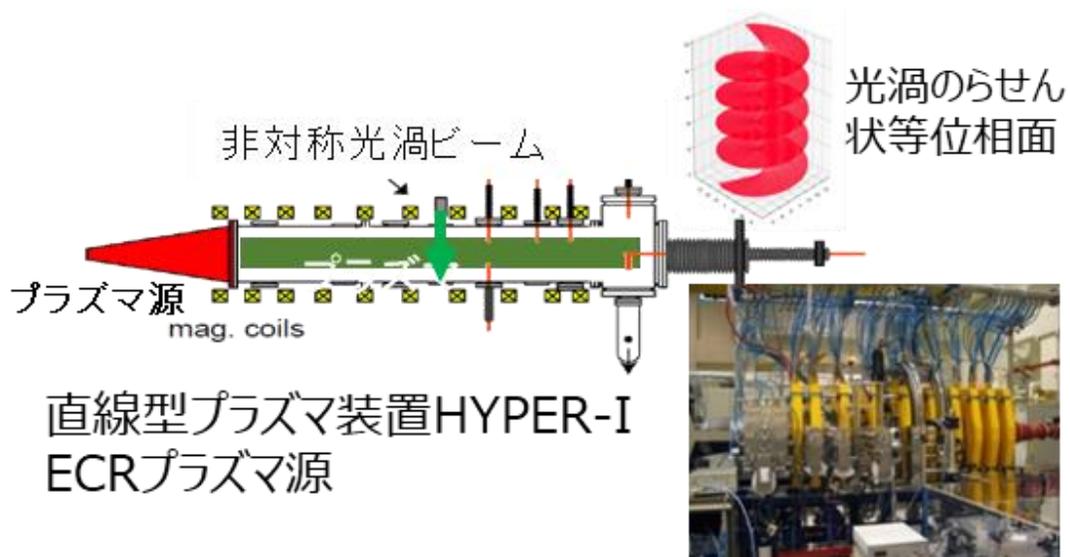
LHDなど実機や直線型装置におけるダイバータデタッチメント研究、プラズマ対向壁からのリサイクリング粒子の励起状態に関するシミュレーション研究、熱的不安定性や光・物質相互作用に関する天文分野との共同研究、プラズマバイオ研究などを進めている。

超高流束協奏材料ユニットと協同のプロジェクトでは、重イオン照射が可能な加速器と直線型プラズマ装置を組み合わせた新しい装置による研究を計画している。

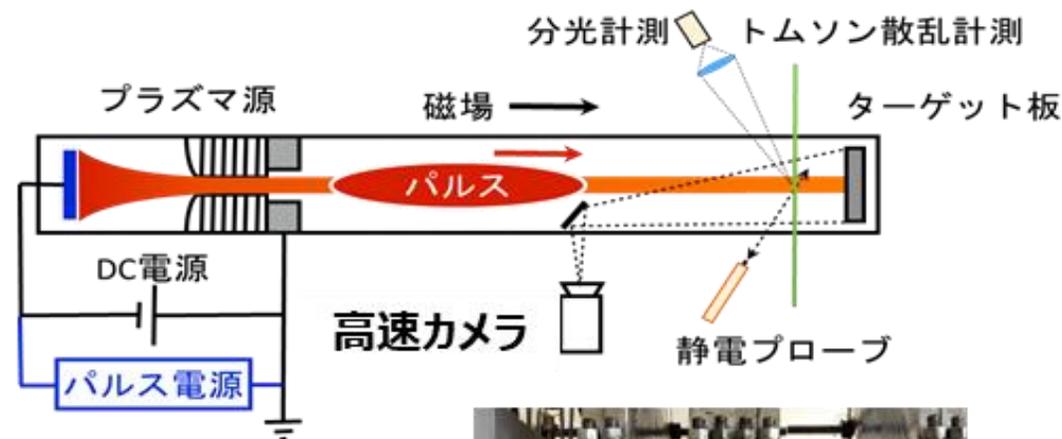
直線型プラズマ装置を用いたプラズマと中性粒子、固体、液体金属との相互作用研究については、HYPER-Iでのイオン・電子・中性粒子の速度ベクトル同時計測手法の開発や、TPD-IIにおける液体金属へのプラズマ照射実験、動的挙動を調べるためのパルスプラズマ印加の準備が進んでいる。（リニアプラズマ・プラットフォーム）

リニアプラズマ・プラットフォーム

- リニアプラズマ・プラットフォームは、直線型の低圧放電プラズマ装置（HYPER-IおよびTPD-II）を用いて、核融合炉の開いた磁力線領域およびダイバータ部を模擬した研究や、プラズマ計測法研究、基礎研究を行う



先進計測として、測定対象に応じて制御した光渦ビームを用いた計測により、従来1次元でしか測定されてこなかったイオン・電子・中性粒子の3次元速度ベクトル同時計測法を世界に先駆けて開発



TPD-II
直流プラズマ源



プラズマ源の改良により定常プラズマに高熱流パルスプラズマを重畳することで、核融合炉における突発的な高熱流プラズマと非接触プラズマの相互作用を模擬

協力組織体制

それぞれの研究テーマにおいて、国内外研究者との共同研究、企業との共同研究、ユニット間連携によるプロジェクトの検討、などを実施している。

- 国内研究機関：
 - 室蘭工大、日大、中部大、横国大、広大、東大、山形大、九大、近畿大、甲南大、国立天文台、分子研、東工大、慶応大、QST、崇城大、基生研、NINSアストロバイオロジーセンター、KEK、茨城大、静大、富山大、島根大、東北大、名大、信州大、京大、筑波大、など
- 外国研究機関：
 - ケルン大、オーストラリア科学アカデミー、KFE、CEA、GA、KTH、VTT、CCFE、Max-Planck IPP、ITER、PPPL、UCSD、など
- 企業：
 - 東邦金属、金属技研、穴織カーボン、HF、など
- ユニット間連携プロジェクト：
 - 超高流束協奏材料ユニット SPICES

特筆すべき成果・見込み

周辺プラズマ、粒子制御

- 周辺プラズマにおけるタングステン不純物輸送に対する乱流効果について理論・シミュレーション研究を行い、不純物分布関数のアンサンブル平均の時間発展はその影響を受けないという結果を得た。
- LHDにおける周辺プラズマへの不純物粉末投下実験と粉末粒子アブレーションのシミュレーションが進展した。5月のPSI会議で招待講演を行う。
- 量子化学技術研究開発機構との共同研究として、JT-60Uトカマク装置のSOLにおける不純物輸送における運動論的効果の影響を調べた。
- ドイツMax Planck IPPとの共同研究で、LHDにおいてITER用のイオンゲージ開発に関わる実験を進めている。

プラズマ・壁相互作用、炉工学

- タングステン中の空孔の振る舞いについて、水素が吸蔵されることにより、空孔が動きやすくなることを分子動力学シミュレーションを用いて明らかにした。
- タングステン壁から発生する水素原子分子を考慮し、その周辺プラズマとの相互作用を含む一連のシミュレーションを分子動力学法—中性粒子輸送コード—SONICコードを用いて計算することで、壁周辺領域での、プラズマ・中性粒子などの密度・温度を求めることができた。
- 異材接合について、先進多段階ろう付接合法(AMSB)による「新構造ダイバータ受熱機器」の製造方法を確立させ、高除熱性能のダイバータ受熱機器を開発し、LHDで実環境試験を実施して良好な結果を得た。
- 直線型プラズマ装置TPD-IIに液体金属流動機構を導入し、液体スズの自由表面流へのプラズマ曝露を実現した。

弱電離プラズマ・光・物質相互作用

- 分子雲中での氷ダストに宇宙線が照射した場合を想定した分子動力学シミュレーションを行い、分子量が大きな有機化合物が生成されることを示した。
- 磁場閉じ込め核融合プラズマの放射冷却過程について、天文学の研究者とともに熱的不安定性の観点から解析を行い、星間分子雲における星形成過程との比較を進めた。
- 地球生命における対称性の破れ（ホモキラリティ）の宇宙起源説を検証するための地上模擬実験を放射光科学、アストロバイオロジーの研究者とともに実施した。宇宙における主要元素である水素からのライマン α 円偏光が有機分子に照射されることにより、光学活性を誘起することが確認された。
- 光渦レーザーを利用した新しいプラズマ流速計測法の開発を国内・国際共同研究として行い、成果を論文にまとめた。
- Maxwell方程式に基づく放射減衰解の古典的な記述は、物理学の基本原理に抵触する解の出現により長年の未完結問題とされてきたが、古典的Friedrichsモデルによる解析でこの問題を解決した。
- ガス温度制御大気圧プラズマジェットを開発し、新規複合ストレス源として分裂酵母へ直接照射して、その分子生物学的な影響を調べる共同研究を行い、得られた成果を論文にまとめた。

思うようにいかない点, その原因分析と解決思案について ユニット評価委員会への要望

- ユニット化によって直線型プラズマ装置実験に参加する所内メンバーが増えることを期待したが、現時点ではプラズマ・複相間輸送ユニットからの参加はない。一方、プラズマ量子プロセスユニットのメンバー 1 名からの提案で、HYPER-I装置を用いた新しい共同研究がスタートした。直線型プラズマ装置でどのようなことができるか、研究所内外での周知が行き届いていないことが原因と考えられる。学会等で核融合研の直線装置（リニアプラズマ・プラットフォーム）に関するシンポジウムを開催することで、所内所外問わずHYPER-I装置を用いた実験提案を広く求めたい。
- 当初計画案から違う方向にテーマが進むこともありますが、ユニット化当初言われていたように、5年、10年後の長い目で見た評価をしていただきたく思います。

エッジにおけるタングステン不純物輸送に対する乱流効果のモデリング研究

不純物の運動方程式に対する乱流効果を5次元位相空間における有界ノイズ \tilde{N} として捉え、不純物分布関数のアンサンブル平均 $\overline{\delta f_Z}$ （それが与える粒子輸送（下記第1項））は、ノイズの影響をまったく受けないと理論的に予測

⇒運動論的シミュレーションにより検証

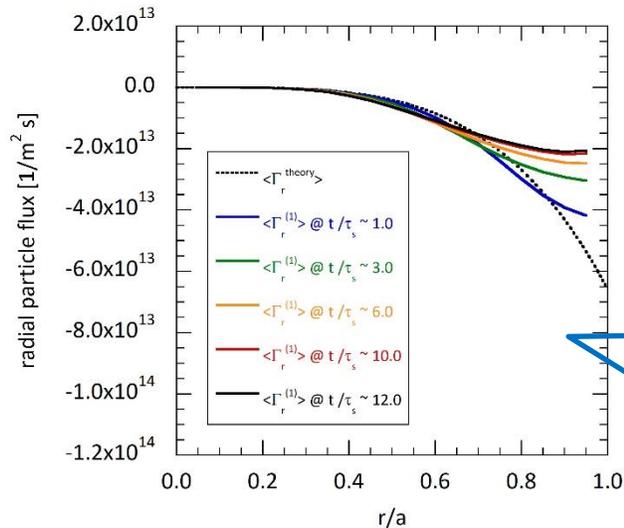
$$\Gamma_r := \int d^3v (\mathbf{v} \cdot \nabla r) \delta f_Z = \int d^3v (\mathbf{v} \cdot \nabla r) \overline{\delta f_Z} + \int d^3v (\mathbf{v} \cdot \nabla r) \delta \tilde{f}_Z$$

研究協力体制（適宜オンラインの研究打合せ、12月に全体議論）

菅野龍太郎 (NIFS)	: モデル及びコード開発、取りまとめ
沼波政倫 (NIFS)	: モデル開発
佐竹真介 (NIFS)	: モデル開発
河村学思 (QST)	: モデル開発
松岡清吉 (QST)	: モデル開発
本間裕貴 (QST)	: モデル開発
星野一生 (Keio U.)	: モデル開発

これまでの共同研究成果（乱流効果は無視）：
ドリフト運動論シミュレーションにより、不純物粒子輸送におけるグローバル効果（粒子軌道の径方向の広がりによる効果）を発見

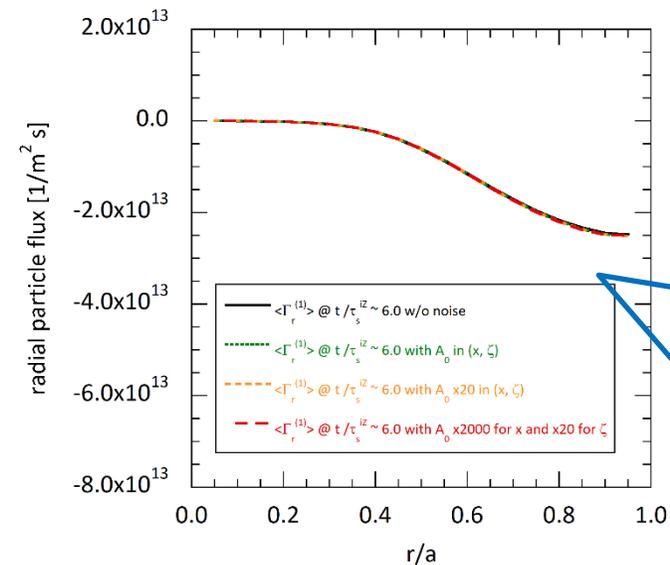
共同研究成果（今回）：
粒子軌道の径方向の広がりに影響を与えるノイズは、その強度に依らず、粒子輸送におけるグローバル効果（第1項）に対して、まったく影響しない



不純物の運動方程式に乱流効果を模
擬した有界ノイズ \tilde{N} を加える

エッジにおける径方向粒子束は、グ
ローバル効果により、新古典理論値
からずれた値に緩和する

R.Kanno et al., Nucl. Fusion **60** (2020) 016033



不純物分布関数 δf_Z によ
り与えられる径方向粒子
束（第1項）の時間発
展において、まったくノイズ
の影響が見られない
⇒理論予測と一致

⇒ 今後の計画：磁気面が壊れた領域におけるタングステン不純物輸送に対する電場の効果

タングステン空孔合体の分子動力学Sim.

中村浩章・矢嶋美幸・宇佐見俊介・後藤勇樹(NIFS), 鶴聡太郎(名大院生), 齋藤誠紀(山形大・戦略メンバー)

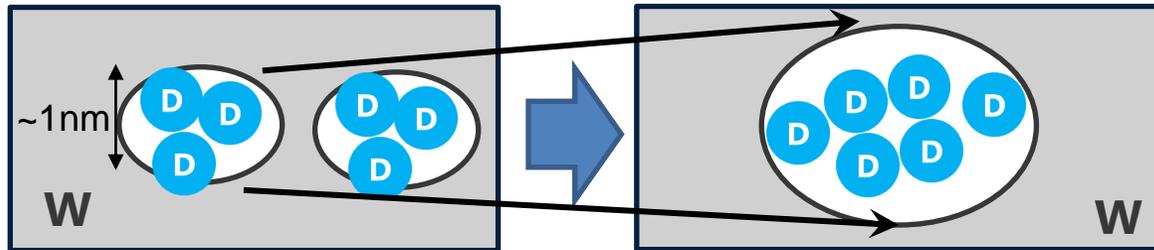
*鶴シミュレーション担当・全員で議論 国際会議2件発表 (論文1本執筆中)

炉壁を想定したタングステン空孔の合体成長のメカニズムの解明

・含有する水素（重水素）により空孔合体しやすくなる実験報告（矢嶋等）
→ 空孔成長過程を分子動力学シミュレーションを用いた原子レベルでの解明を目指す。

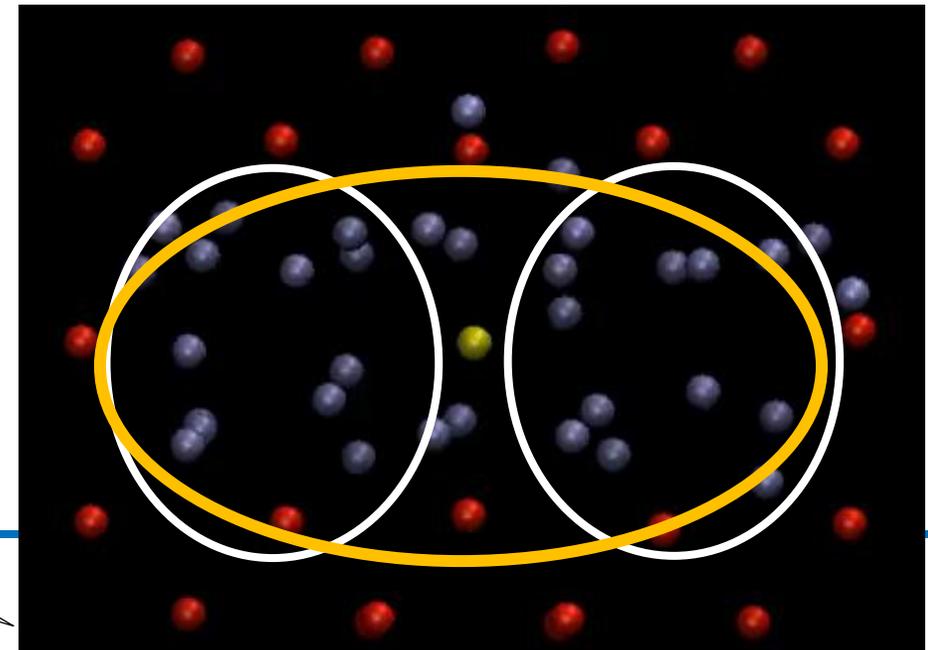
実験による測定(矢嶋等)

水素照射で、タングステン空孔が
大きく成長した



- 仕切りタングステン
- タングステン(バルク)
- 水素

2つの空孔(水素含む)の合体



化学進化論：分子雲中の氷ダストでの有機分子合成の分子動力学Sim.

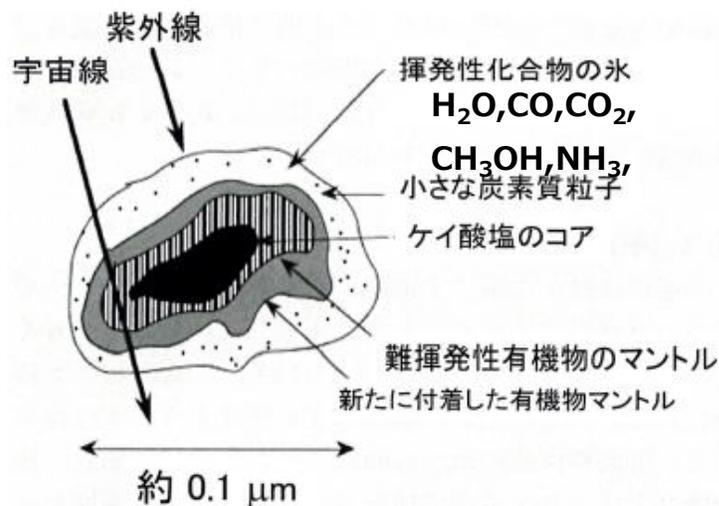
中村浩章・矢嶋美幸・宇佐見俊介・後藤勇樹・小林政弘(NIFS), 村井優志(名大院生), 小林憲正(横国大・戦略メンバー), 加藤政博(広大・IMS・NIFS客員・戦略メンバー), 左近樹(東大天文), 齋藤誠紀(山形大・戦略メンバー), 奥村久士(ExCELLs)

*NIFS Simulation担当、問題設定は小林憲正氏・左近樹氏。 国際会議5件発表 (論文1本執筆中)

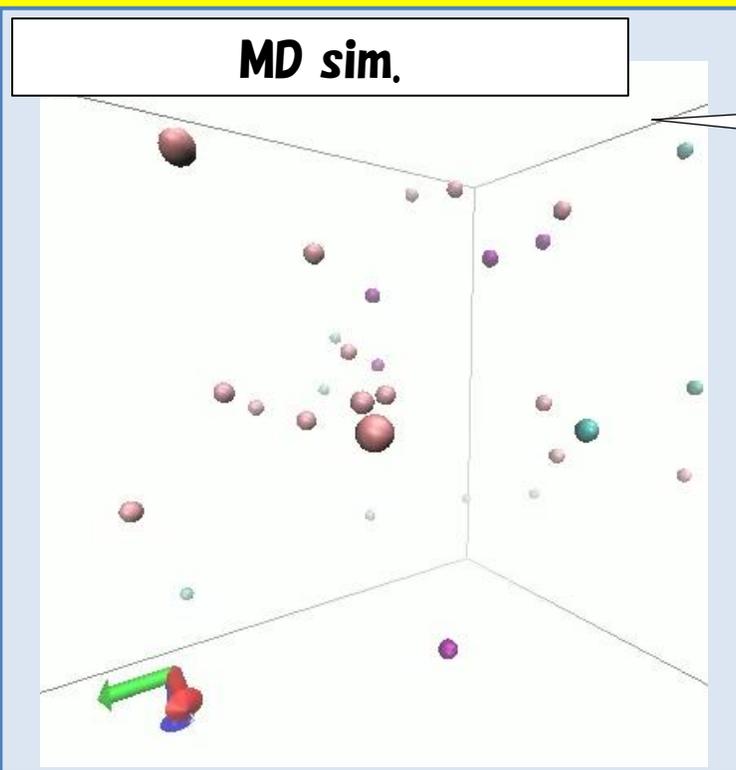
宇宙空間で生命の起源物質合成 (化学進化) のボトムアップシナリオ

【分子雲内の小分子 (氷のダスト) が、宇宙線の照射下で気化・再結合により、有機物を生成】
→ 生成過程を分子動力学シミュレーションを用いた原子レベルでの解明を目指す。

不純物を含んだ氷ダスト

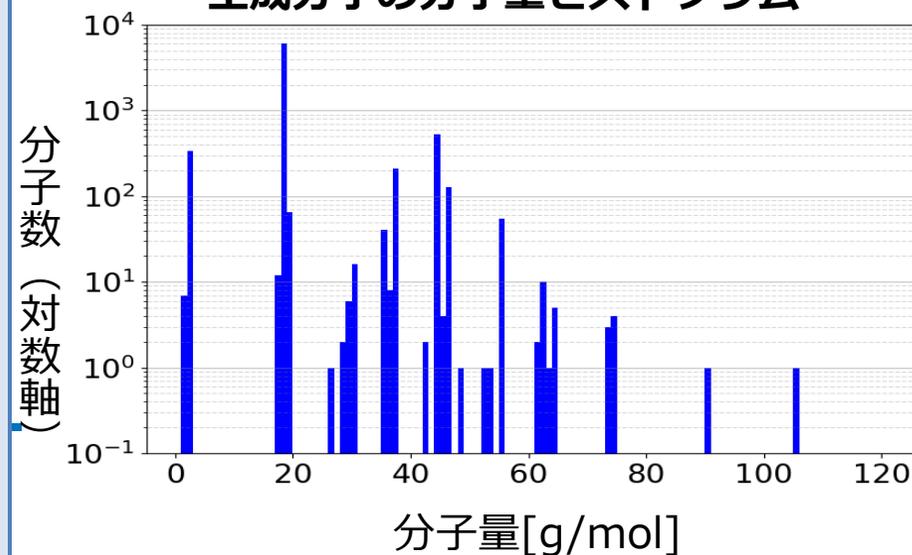


MD sim.



● 炭素 ● 酸素 ● 水素 ● 窒素

生成分子の分子量ヒストグラム



古典的減衰過程を伴う 電子サイクロトロン運動とその放射場



NIFS

後藤勇樹
中村浩章



大阪公大

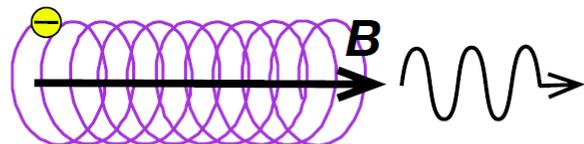
Savannah
Garmon



テキサス大

Tomio
Petrosky

☑ 着目する物理モデル



電子サイクロトロン運動

電子サイクロトロン放射

→これらは**減衰過程を含む**本質的に古典的な現象

☑ Abraham-Lorentz(AL)方程式

$$m_e \frac{d^2 \mathbf{r}}{dt^2} = \mathbf{F}_{\text{ex}}(t) + m_e \tau \frac{d^3 \mathbf{r}}{dt^3}$$

→古典的減衰過程を取り扱うために提案された

問題点

- ▶ 位置の3回微分項の影響により非物理的な解となる
 - 時間的に発散する暴走解
 - 暴走解を取り除くために提案された初期条件が因果律に反している



☑ 本研究でのアプローチ

- 減衰過程を含む全系の力学をFriedrichsモデルにより解析

$$H = \omega_1 q_1^* q_1 + \int_{-\infty}^{\infty} dk \omega_k q_k^* q_k + \lambda \int_{-\infty}^{\infty} dk (q_1 - q_1^*) (V_k q_k - V_k^* q_k^*)$$



AL方程式に内在する固有の困難さを克服し、古典的輻射減衰解を基本方程式から導出することに成功[1]

[1] Y. Goto et al., Prog. Theor. Exp. Phys., **2024**, 033A02 (2024)

今後の展開

円柱導波管内で電子サイクロトロン運動を議論し、光渦との関連を解析する

プラズマ-液体金属相互作用研究

- 鉄系材料の表面改質（Fe-Sn金属間化合物層の形成）により、表面張力の大きな液体Snでの自由表面流形成手法を確立

浜地(NIFS), 増崎(NIFS)

- 直線型プラズマ装置TPD-II(@NIFS)に、液体金属流動機構部を設置し、液体Snの自由表面流へのプラズマ曝露試験を実施

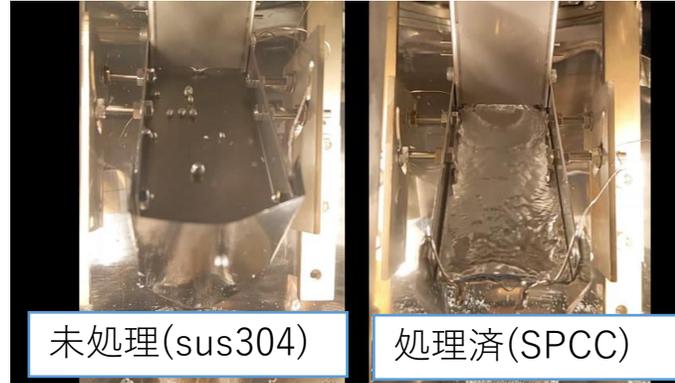
浜地(NIFS), 林(東京大学), 増崎(NIFS)

- 液体金属からのプラズマ打ち込み粒子透過計測実験装置の設計・製作を開始

浜地(NIFS), 豊田(名古屋大学), 波多野(富山大学), 原(富山大学) 増崎(NIFS)

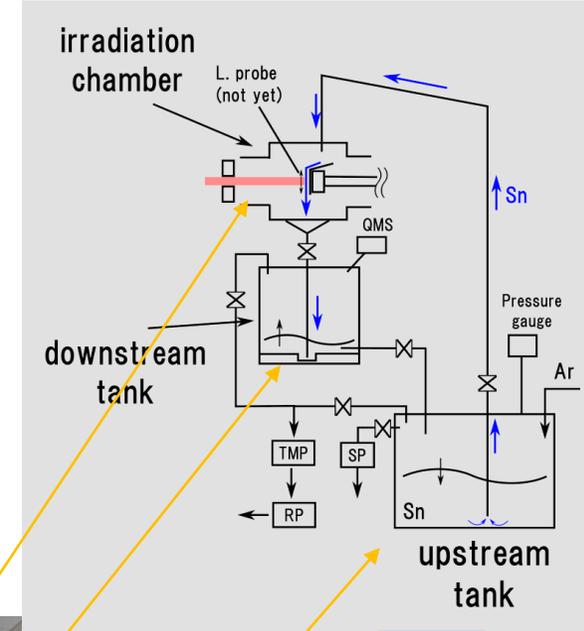
2024年度以降の研究計画

- TPD-IIへのプローブ・分光計測の増強
 - Sn自由表面流のプラズマへの影響
- 打ち込み粒子の液体流れによる移送研究
- 液体Sn自由表面流のLHDダイバータプラズマへの曝露実験
- 液体金属での打ち込み粒子透過研究

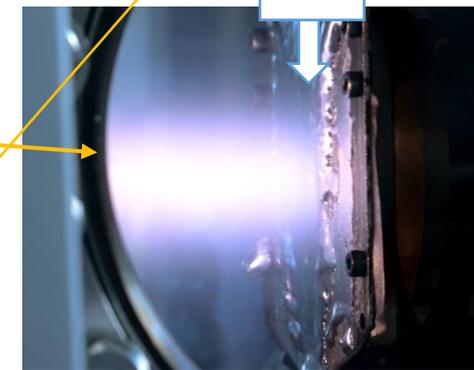


未処理(sus304)

処理済(SPCC)

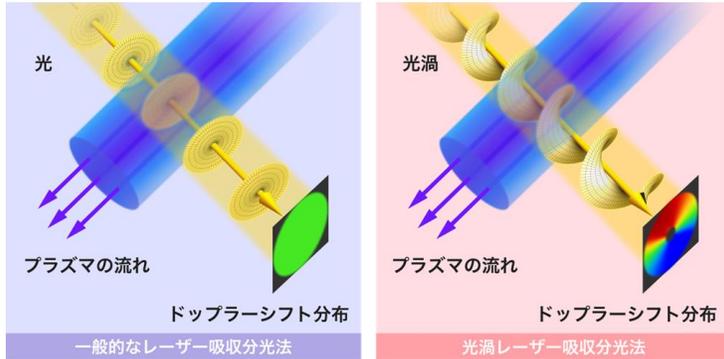


直線型プラズマ装置TPD-IIとプラズマ曝露したSn自由表面流



光渦レーザーを利用したプラズマ計測

協力組織体制：吉村信次，荒巻光利（日本大学，研究戦略会議所外メンバー），寺坂健一郎（崇城大学），皆川裕貴（日本大学）

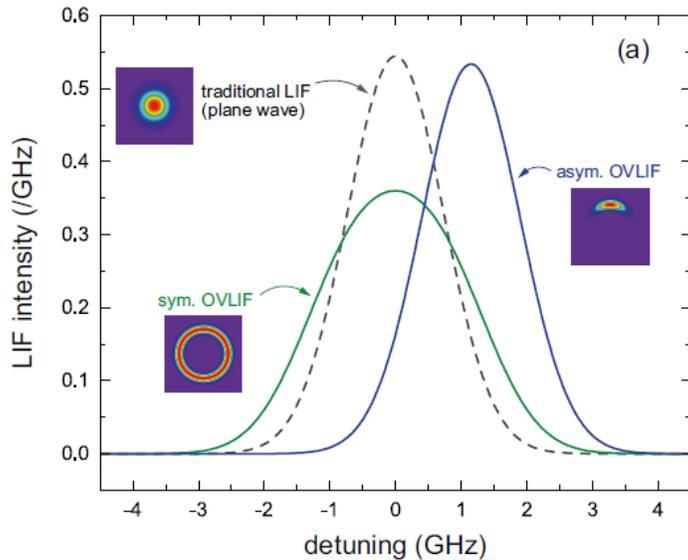


レーザー光の位相を制御して光渦ビームとすることで，光路に垂直な粒子の運動にも感度をもたせる．光渦中の原子が感じるドップラー効果の空間変化から，光渦レーザー吸収分光法によって，光路を横切るアルゴン原子の流速（50-150 m/s）を高精度に測定した．

H. Minagawa, S. Yoshimura, K. Terasaka, M. Aramaki, “Enhancement of Doppler spectroscopy to transverse direction by using optical vortex”, *Sci. Rep.* **13**, 15400 (2023).

シングルパスで十分な吸収がない場合，光渦レーザー吸収分光法は使用できない．強度分布を非対称化した光渦を用いたレーザー誘起蛍光法によって，光路を横切るイオンの流速を検出可能であることを数値計算で示した．

K. Terasaka, S. Yoshimura, H. Minagawa, M. Aramaki, “Three-dimensional flow velocity determination using laser-induced fluorescence method with asymmetric optical vortex beams”, *Sci. Rep.* **14**, 2005 (2024)

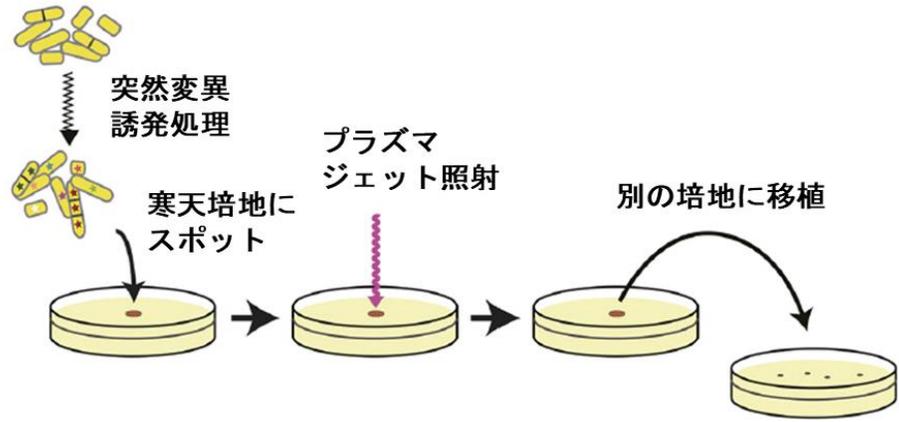


今後の計画

HYPER-I 装置を用いた非対称光渦レーザー誘起蛍光法の原理実証実験．
2024年度より，寺坂氏が当ユニットの客員准教授となり，研究を推進する．

プラズマバイオ研究

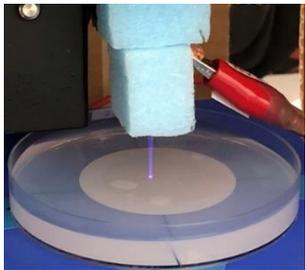
協力組織体制：吉村信次，大坪瑤子（東京大学），山下朗（東京大学），
定塚勝樹（基礎生物学研究所，自然科学研究機構アストロバイオロジーセンター）



プラズマを一度の照射で，電気的な刺激，紫外線，活性酸素や活性窒素といった各種活性種などを生体に与える複合ストレス源として使用した。プラズマ照射条件下でも増殖可能な分裂酵母のプラズマ耐性変異体は多細胞体となっていた。プラズマ照射によって発現状態が変化する遺伝子の網羅的解析から，細胞分裂を制御する経路と栄養状態を伝達する経路を介して応答していることを見出した。

生き残ったコロニーを取り出す

Y. Otsubo, A. Yamashita, Y. Goto, K. Sakai, T. Iida, S. Yoshimura, K. Johzuka, “Cellular responses to compound stress induced by atmospheric-pressure plasma in fission yeast”, *J. Cell Sci.* **136**, jcs261292 (2023).



野生型



プラズマ耐性変異体



10 μ m

今後の計画

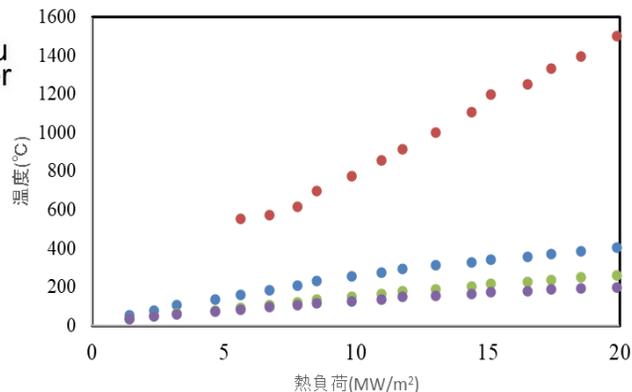
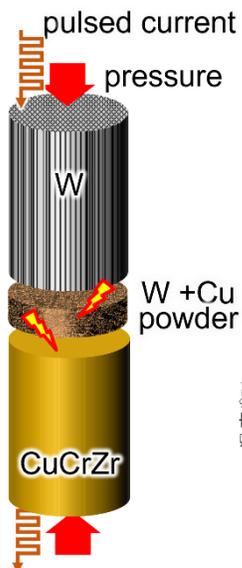
分光計測により，照射されるプラズマジェットを評価する。

2024年度より，眞銅氏が特任准教授となり，植物の種子へのプラズマ照射の影響に関する研究を推進する。

炉内高熱流束機器に用いる異種金属接合法の研究

背景

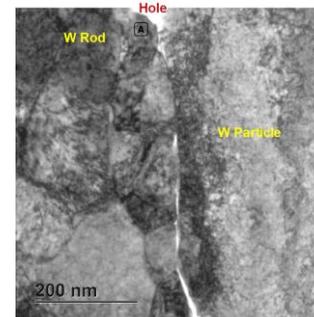
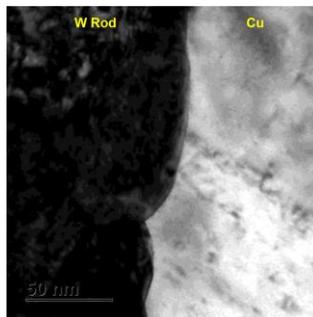
これまでSPSによるW-Cuの接合を行い、 $20\text{MW}/\text{m}^2$ までの熱負荷への健全性が確認されている。



令和5年度の成果

(1) W-Cu接合面のSEM-TEM/EDS観察を実施(九大)

- ・Wと中間層のCu粉末との結合は良好(下左図)
- ・Wと中間層のW粉末との界面には空隙あり(下右図)



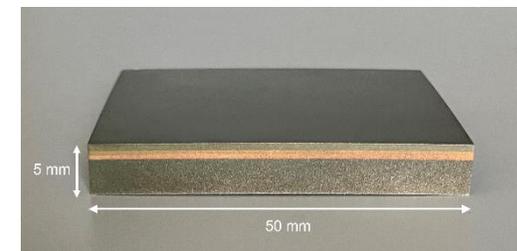
(2) C-TZM接合の試み(QST)

- ・接合温度、雰囲気、中間層材料の最適値を探索中
- ・現時点でMoを中間層材で良い結果が得られている



(3) W-SUS接合の試み(九大)

- ・Ni中間層では亀裂が発生
- ・Cu系の多層構造にしたところ接合を確認



共同研究体制

- ・九大(九大応力研共同研究)
- ・QST(NIFS共同研究)
- ・KEK(NIFS共同研究)
- ・東邦金属、穴織カーボン(NIFS-民間共同研究)
- ・海外:KFE(韓)、CEA(仏)、GA(米)

今後の計画

- ・SPS接合界面のミクロスコピックな調査 ⇒ 接合性能との関係
- ・SiC-C接合の試み ⇒ 米国GAとの共同研究開始

LHDにおけるプラズマ・壁相互作用

矢嶋美幸・増崎貴・時谷政行・本島 巖(プラズマ・複相関輸送ユニット),
田中将裕(可知化センシングユニット), 吉田直亮(九大), 大塚哲平(近畿大)
国内会議1件(2023年11月)、国際会議2件(2024年5月発表予定) (論文2本投稿予定)

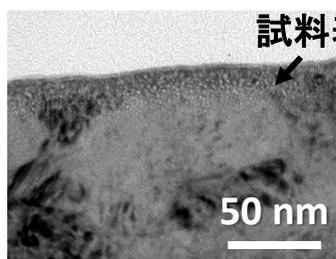
ヘリカル型核融合実験装置におけるガス吸蔵・放出特性のメカニズムの解明

- ・将来の核融合炉では継続的な運転を実施する必要がある
- 真空容器内におけるガス吸蔵・放出特性の理解は必要不可欠な課題の一つ
- トリチウムを含むガスの吸蔵・放出特性と表面変質のメカニズム解明を目指す

LHDでは2019年からタングステン(W)被覆黒鉛ダイバータタイルを(一部)導入
→長期設置試料(SUS316L)を2種類のダイバータ近傍の第一壁上に設置し、
材料の表面変質とトリチウム保持量の違いを明らかにした

C21-9-1

(黒鉛ダイバータ近傍設置試料)



C21-10-1

(W被覆黒鉛ダイバータ近傍設置試料)

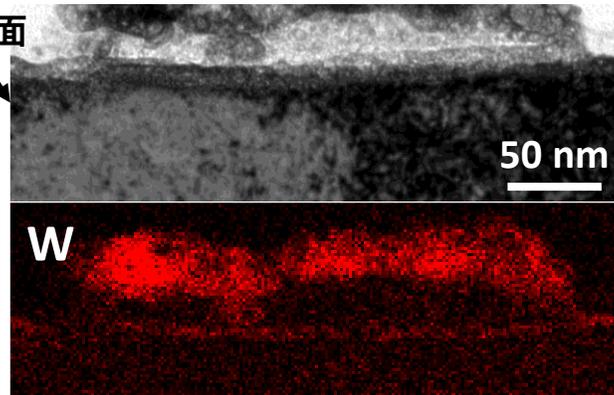


図) 試料断面観察結果

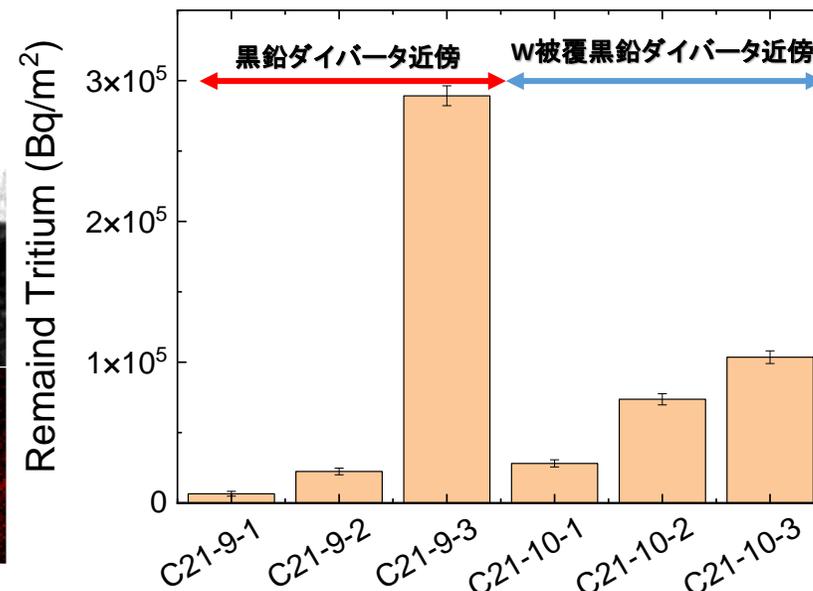
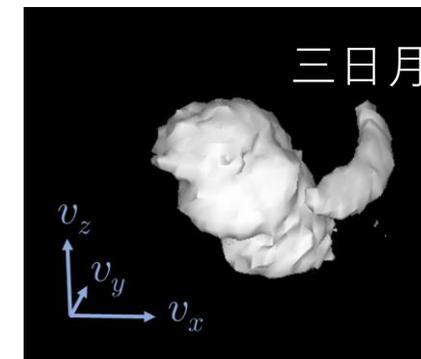


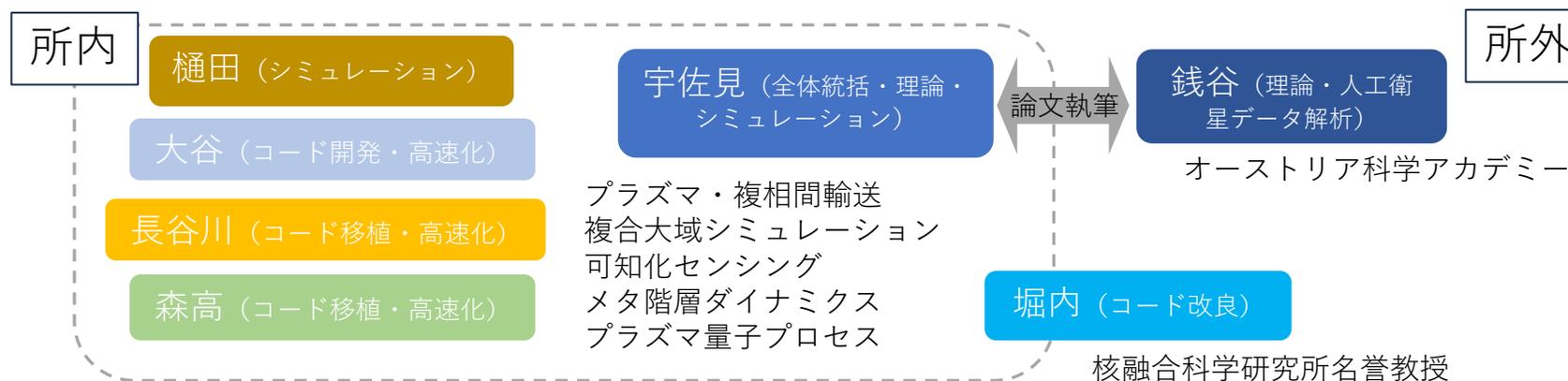
図) トリチウム保持量計測結果

速度分布解析によるプラズマ過程探求

- 2023年度は、三日月型速度分布に着目
 - 定説「三日月は磁場反転下で作られる」を覆した。
 - 既存論を大幅に拡張し、3次元構造理論を構築した。
 - 磁気再結合の粒子シミュレーションで検証した。



- 研究体制：Zoomなどで進捗を定期的に報告・議論



- 今後の計画
 - 三日月型速度分布理論を、電子、非対称磁気再結合への拡張
 - 三日月をはじめとした非マクスウェル速度分布が駆動する不安定性の解析
 - 球状トカマク装置内などの具体的な系で、速度分布関数解析